



Taqsimlovchi elektr tarmoqlarida izolyatsiya parametrlarini diagnostika qilish asosida elektr xavfsizligi xavflarini aniqlash va baholash usullari

Gulchexra E. Saidova

katta o'qituvchi, Muhammad al-Xorazmiy nomidagi Toshkent Axborot Texnologiyalari Universiteti, Toshkent, 100084, O'zbekiston; gulisaidova62@gmail.com <https://orcid.org/0009-0000-1001-9678>

Dolzarbli: Maqolada tadqiqot vazifalarining dolzarbligi va amaliy zarurati taqsimlovchi elektr tarmoqlarida izolyatsiya holatini ishonchli baholash hamda elektr xavfsizligini ta'minlash ehtiyojlari nuqtayi nazaridan asoslangan. Izolyatsiyaning eskirishi, namlanishi, ifloslanishi va mexanik shikastlanishi natijasida faza–yer oralig'idagi sizib o'tish toklarining ortishi, bir fazali yerga tutashuvlar va ko'p fazali avariylarning rivojlanish xavfi izolyatsiya parametrlarini nazorat qilishning ilmiy-amaliy ahamiyatini belgilaydi.

Tadqiqot vazifalarining zarurati amalda qo'llaniladigan diagnostik usullarning imkoniyatlari va cheklovlarini qiyosiy tahlil qilish orqali ochib berilgan. Xususan, bevosita yerga tutashuv va ampermetr–voltmetr usullarida sun'iy yerga tutashuv hosil qilish, shikastlanmagan fazalarda kuchlanishning ortishi, xodimlar va elektr uskunalari uchun qo'shimcha xavf yuzaga kelishi hamda alohida fazalar izolyatsiyasini mustaqil baholash imkoniyatining cheklanganligi ko'rsatilgan. Ushbu holatlar izolyatsiyaning umumiy, aktiv va reaktiv o'tkazuvchanliklarini kompleks tahlil qilish, diagnostik mezonlarni asoslash va o'lchash usullarini takomillashtirish vazifalarining amaliy ehtiyojdan kelib chiqqanligini tasdiqlaydi.

Maqolada qo'shimcha aktiv o'tkazuvchanlikdan foydalanishda katta quvvat ajralishi va harorat ta'sirida parametrlarning o'zgarishi kabi texnik cheklovlarning yoritilishi, shuningdek, qo'shimcha sig'im ulash usulining imkoniyatlari tahlil qilinishi tadqiqotning muhandislik ahamiyatini kuchaytiradi. Belgilangan vazifalar izolyatsiya holatidagi xavfli o'zgarishlarni barvaqt aniqlash, o'lchash natijalarining ishonchligini oshirish va tarmoq ish rejimini buzmaydigan monitoring vositalarini rivojlantirishga yo'naltirilgan.

Shu asosda, tadqiqot vazifalarining dolzarbligi va talab qilinishi maqolada nazariy hamda texnik tahlil darajasida yetarlicha asoslangan, deb baholash mumkin. Ayni paytda, ushbu asoslarni aniq ekspluatatsion statistika, tajriba natijalari va mavjud usullar bilan miqdoriy taqqoslash ma'lumotlari orqali to'ldirish tadqiqotning daliliy bazasini yanada mustahkamlaydi.

Maqsad: Taqsimlovchi elektr tarmoqlarida bevosita bir fazali yerga tutashuv, ampermetr–voltmetr hamda qo'shimcha aktiv va reaktiv o'tkazuvchanlikni ulash usullarining diagnostik imkoniyatlarini tahlil qilish, izolyatsiyaning umumiy, aktiv va reaktiv o'tkazuvchanliklari hamda impedansi bilan elektr xavfsizligi xavf-xatarlari o'rtasidagi bog'liqliklarni aniqlash va izolyatsiya holatini ishonchli baholashga xizmat qiluvchi diagnostik mezonlarni asoslashdan iborat.

Usullar: Tadqiqotda qiyosiy va analitik tahlil, elektr zanjirlarini ekvivalent sxemalar asosida modellashtirish hamda hisoblash usullaridan foydalanildi. Bevosita bir fazali yerga tutashuv usulida yerga tutashuv toki va faza–yer kuchlanishi o'lchanib, izolyatsiyaning umumiy o'tkazuvchanligi va impedansi aniqlandi. Ampermetr–voltmetr usulida faza va yer orasiga ma'lum qiymatdagi qo'shimcha aktiv yoki reaktiv o'tkazuvchanlik ulanishidan oldingi va keyingi kuchlanishlar asosida izolyatsiyaning aktiv, sig'im va umumiy o'tkazuvchanliklari hisoblandi. Shuningdek, chiziqli kuchlanish, nol ketma-ketlik kuchlanishi va faza–yer kuchlanishi qiymatlaridan foydalanishga asoslangan hisoblash ifodalari hamda qo'shimcha sig'imni ulash usulining texnik imkoniyatlari tahlil qilindi.

Natijalar: Izolyatsiyaning umumiy o'tkazuvchanligi yerga tutashuv tokining faza–yer kuchlanishiga nisbati $y_{iz}=I_{f,e}/U_{f,e}$, umumiy impedansi esa $Z_{iz}=1/y_{iz}$ orqali baholanishi asoslandi. Aktiv o'tkazuvchanlikning ortishi izolyatsiyadagi sizib o'tish toki va dielektrik yo'qotishlarning ko'payishini, reaktiv o'tkazuvchanlikning ortishi esa faza–yer sig'im toki hamda bir fazali yerga tutashuv toklarining kattalashishini ko'rsatishi aniqlandi. Umumiy o'tkazuvchanlikning ortishi va impedansning kamayishi izolyatsiya holati yomonlashuvining asosiy diagnostik belgilari sifatida belgilandi. Qo'shimcha o'tkazuvchanlik qiymatini izolyatsiyaning dastlabki umumiy o'tkazuvchanligiga nisbatan 0,5–2,0 oralig'ida tanlash o'lchash sezgirligini oshirishi va hisoblash xatoligini kamaytirishi ko'rsatildi. Yuqori kuchlanishli aktiv o'tkazuvchanlikning katta quvvat tarqatishi va haroratga bog'liqligi sababli qo'shimcha sig'im sifatida quvvat kondensatorlaridan foydalanish maqsadga muvofiqligi asoslandi. Izolyatsiyaning umumiy, aktiv va reaktiv parametrlarini kompleks baholash yashirin nuqsonlarni aniqlash, izolyatsiya holatining yomonlashish tendensiyasini kuzatish hamda elektr xavfsizligi xavf-xatarlarini oldindan baholash imkonini beradi.

Kalit so'zlar: taqsimlovchi elektr tarmog'i, izolyatsiya diagnostikasi, elektr xavfsizligi, bir fazali yerga tutashuv, yerga tutashuv toki, ampermetr–voltmetr usuli, aktiv o'tkazuvchanlik, reaktiv o'tkazuvchanlik, izolyatsiya impedansi, qo'shimcha sig'im, teginish kuchlanishi, qadam kuchlanishi.

For citation: Saidova G.E., Methods for identifying and assessing electrical safety risks based on diagnostics of insulation parameters in distribution electrical networks. Scientific and technical journal of Problems of Energy and Sources Saving, 2026, no. 3(1), pp. 106-115.

<https://doi.org/10.5281/zenodo.23465172>

Received: 08.04.2026
Revised: 28.04.2026
Accepted: 10.06.2026
Published: 19.10.2026

Copyright: © Gulchexra E. Saidova, 2026. Submitted to Problems of Energy and Sources Saving for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



Методы выявления и оценки рисков электробезопасности на основе диагностики параметров изоляции в распределительных электрических сетях

Гулчехра Е. Саидова

старший преподаватель., Ташкентский университет информационных технологий имени Мухаммада ал-Хоразмий, Ташкент, 100084, Узбекистан; gulisaidova62@gmail.com <https://orcid.org/0009-0000-1001-9678>

Актуальность. В статье актуальность и практическая значимость поставленных исследовательских задач обоснованы необходимостью достоверной оценки состояния изоляции распределительных электрических сетей и обеспечения электробезопасности. Старение изоляции, её увлажнение, загрязнение и механические повреждения способствуют увеличению токов утечки между фазой и землёй, возникновению однофазных замыканий на землю и развитию многофазных аварий. Указанные факторы определяют научно-практическую значимость контроля параметров изоляции и своевременного выявления признаков ухудшения её технического состояния.

Необходимость решения поставленных задач раскрыта посредством сравнительного анализа диагностических возможностей и ограничений применяемых методов измерения. В частности, рассмотрены риски, связанные с созданием искусственного замыкания на землю при использовании метода непосредственного замыкания на землю и метода амперметра–вольтметра: повышение напряжения неповреждённых фаз относительно земли и возникновение дополнительной опасности для персонала и электрооборудования. Отмечена также ограниченность возможностей раздельной оценки состояния изоляции отдельных фаз. Выявленные ограничения обосновывают необходимость комплексного анализа полной, активной и реактивной проводимостей изоляции, уточнения диагностических критериев и совершенствования методов измерения.

Инженерная значимость исследования определяется рассмотрением технических ограничений, возникающих при подключении дополнительной активной проводимости, включая значительную рассеиваемую мощность и температурную зависимость параметров измерительного элемента. Анализ возможностей подключения дополнительной ёмкости позволяет рассмотреть альтернативный подход к определению параметров изоляции с учётом указанных ограничений. Поставленные задачи ориентированы на раннее выявление неблагоприятных изменений состояния изоляции, повышение достоверности результатов измерений и обоснование направлений разработки средств мониторинга, не нарушающих рабочий режим сети.

Актуальность и практическая необходимость поставленных исследовательских задач достаточно обоснованы в рамках представленного теоретического и технического анализа. Вместе с тем доказательная база исследования может быть усилена за счёт привлечения эксплуатационной статистики, результатов экспериментальных измерений и количественного сопоставления рассматриваемых методов по показателям точности, чувствительности и безопасности.

Цель: Анализ диагностических возможностей методов непосредственного однофазного замыкания на землю, амперметра–вольтметра и подключения дополнительных активной и реактивной проводимостей в распределительных электрических сетях, установление взаимосвязей между полной, активной и реактивной проводимостями, импедансом изоляции и рисками электробезопасности, а также обоснование диагностических критериев для достоверной оценки технического состояния изоляции.

Методы: В исследовании применены методы сравнительного и аналитического анализа, моделирования электрических цепей на основе эквивалентных схем и расчётной оценки параметров изоляции. При использовании метода непосредственного однофазного замыкания на землю измерялись ток замыкания на землю и напряжение фазы относительно земли, на основании которых определялись полная проводимость и импеданс изоляции. В методе амперметра–вольтметра активная, ёмкостная и полная проводимости изоляции рассчитывались по результатам измерения напряжения фазы относительно земли до и после подключения дополнительной активной или реактивной проводимости известного значения. Проанализированы расчётные зависимости, основанные на измерении линейного напряжения, напряжения нулевой последовательности и напряжения фазы относительно земли, а также технические возможности метода подключения дополнительной ёмкости.

Результаты: Установлено, что полная проводимость изоляции может быть определена как отношение тока замыкания на землю к напряжению фазы относительно земли $y_{из} = I_{ф.з} / U_{ф.з}$, а полный импеданс изоляции — по выражению $Z_{из} = 1 / y_{из}$. Показано, что увеличение активной проводимости свидетельствует о возрастании токов утечки и диэлектрических потерь в изоляции, а увеличение реактивной проводимости — о росте ёмкостного тока относительно земли и тока однофазного замыкания. Увеличение полной проводимости и уменьшение импеданса определены как основные диагностические признаки ухудшения состояния изоляции. Установлено, что выбор дополнительной проводимости в диапазоне от $0,5y_{из}$ до $2y_{из}$ повышает чувствительность измерений и снижает расчётную погрешность. В связи со значительной рассеиваемой мощностью высоковольтной активной проводимости и зависимостью её параметров от температуры обоснована целесообразность применения силовых конденсаторов в качестве дополнительной ёмкости. Комплексная оценка полной, активной и реактивной составляющих проводимости позволяет выявлять скрытые дефекты, отслеживать тенденции ухудшения состояния изоляции и заблаговременно оценивать риски электробезопасности.

Ключевые слова: распределительная электрическая сеть, диагностика изоляции, электробезопасность, однофазное замыкание на землю, ток замыкания на землю, метод амперметра–вольтметра, активная проводимость, реактивная проводимость, импеданс изоляции, дополнительная ёмкость, напряжение прикосновения, шаговое напряжение.

Methods for identifying and assessing electrical safety risks based on diagnostics of insulation parameters in distribution electrical networks

Gulchekhra E. Saidova

head teacher, Tashkent University of Information Technologies named after Muhammad al-Khwarizmi, Tashkent, 100084, Uzbekistan; gulisaidova62@gmail.com <https://orcid.org/0009-0000-1001-9678>

Relevance: The article establishes the relevance and practical significance of the research objectives by addressing the need for reliable insulation condition assessment and electrical safety in distribution networks. Insulation ageing, moisture ingress, contamination, and mechanical damage can increase phase-to-earth leakage currents and contribute to single-phase earth faults that may develop into multiphase faults. These risks underscore the scientific and practical importance of monitoring insulation parameters and detecting deterioration at an early stage.

The need to address the research objectives is substantiated through a comparative analysis of the capabilities and limitations of existing diagnostic methods. Specifically, the study examines the limitations of the direct earth-fault and ammeter–voltmeter methods, including the intentional creation of an earth fault, increased phase-to-earth voltages on healthy phases, additional risks to personnel and electrical equipment, and limited capability to assess the insulation condition of individual phases separately. These limitations justify the comprehensive analysis of insulation admittance and its conductive and susceptive components, the establishment of diagnostic criteria, and the refinement of measurement techniques.

The engineering significance of the study is reinforced by its examination of the technical constraints associated with connecting an additional conductance, particularly substantial power dissipation and temperature-dependent changes in the parameters of the resistive element. The analysis of the additional-capacitance method provides a basis for considering an alternative approach to determining insulation parameters while addressing these constraints. The research objectives are directed towards the early detection of adverse changes in insulation condition, improved measurement reliability, and the development of monitoring approaches that do not disrupt normal network operation.

Accordingly, the relevance and practical necessity of the research objectives are adequately substantiated within the scope of the theoretical and technical analysis presented. Nevertheless, incorporating operational statistics, experimental measurements, and quantitative comparisons of the methods in terms of accuracy, sensitivity, and safety would further strengthen the study's evidence base.

Aim: To analyse the diagnostic capabilities of the direct single-phase earth-fault method, the ammeter–voltmeter method, and methods involving the connection of additional active and reactive admittances in distribution electrical networks; to establish relationships between the total admittance, conductance, susceptance, insulation impedance, and electrical safety risks; and to substantiate diagnostic criteria for the reliable assessment of insulation condition.

Methods: The study employed comparative and analytical methods, equivalent-circuit modelling, and calculation-based assessment of insulation parameters. In the direct single-phase earth-fault method, the earth-fault current and phase-to-earth voltage were measured to determine the total insulation admittance and impedance. In the ammeter–voltmeter method, the insulation conductance, capacitive susceptance, and total admittance were calculated from phase-to-earth voltage measurements obtained before and after connecting an additional active or reactive admittance of a known value. Calculation relationships based on line voltage, zero-sequence voltage, and phase-to-earth voltage measurements were analysed. The technical capabilities of the method involving the connection of an additional capacitance were also evaluated.

Results: It was established that the total insulation admittance can be determined as the ratio of the earth-fault current to the phase-to-earth voltage, $y_{ins}=I_{e.f}/U_{ph-e}$, while the total insulation impedance can be calculated as $Z_{ins}=1/y_{ins}$. An increase in insulation conductance indicates higher leakage currents and dielectric losses, whereas an increase in capacitive susceptance results in higher phase-to-earth capacitive current and single-phase earth-fault current. An increase in total admittance and a decrease in insulation impedance were identified as the main diagnostic indicators of insulation deterioration. Selecting the additional admittance within the range of $0.5y_{ins}$ to $2y_{ins}$ improves measurement sensitivity and reduces calculation errors. Due to the high power dissipation and temperature dependence of high-voltage active conductance elements, the use of power capacitors as an additional capacitance was substantiated. Comprehensive assessment of the total admittance, conductance, and susceptance provides a basis for detecting hidden insulation defects, monitoring insulation deterioration trends, and predicting electrical safety risks.

Keywords: electrical distribution networks, insulation diagnostics, electrical safety, single-line-to-ground fault, ground-fault current, ammeter–voltmeter method, conductance, susceptance, insulation impedance, additional capacitance, touch voltage, step voltage.

1. Kirish (Introduction)

Taqsimlovchi elektr tarmoqlarining ishonchli va xavfsiz ishlashi izolyatsiyaning texnik holatiga bog'liq. Izolyatsiyaning eskirishi, namlanishi, ifloslanishi va mexanik shikastlanishi faza–yer sizib o'tish toklarining ortishiga, bir fazali yerga tutashuvlar, teginish va qadam kuchlanishlari hamda ko'p fazali avariylarning yuzaga kelishiga sabab bo'ladi. Izolyatsiya umumiy o'tkazuvchanligining ortishi va impedansining kamayishi uning holati yomonlashayotganini ko'rsatuvchi asosiy diagnostik belgilar hisoblanadi [11-13].

Izolyatsiya parametrlarini aniqlashda bevosita bir fazali yerga tutashuv va ampermetr–voltmetr usullari qo'llaniladi. Ushbu usullar sodda, tezkor va yetarli aniqlikka ega. Biroq sun'iy yerga tutashuv hosil qilinishi sog'lom fazalardagi kuchlanishni oshiradi, xodimlar va uskunalar uchun xavf tug'diradi hamda alohida fazalarning izolyatsiya holatini aniqlash imkonini bermaydi.

Qo'shimcha aktiv yoki reaktiv o'tkazuvchanlikni ulash orqali izolyatsiyaning umumiy, aktiv va reaktiv tashkil etuvchilarini alohida baholash mumkin. Aktiv o'tkazuvchanlik sizib o'tish toki va dielektrik yo'qotishlarni, reaktiv o'tkazuvchanlik esa faza–yer sig'im toki va yerga tutashuv tokini tavsiflaydi. Yuqori kuchlanishli aktiv o'tkazuvchanlikning katta quvvat sarflashi va haroratga bog'liqligi sababli qo'shimcha sig'im sifatida quvvat kondensatorlaridan foydalanish maqsadga muvofiqdir [9-10].

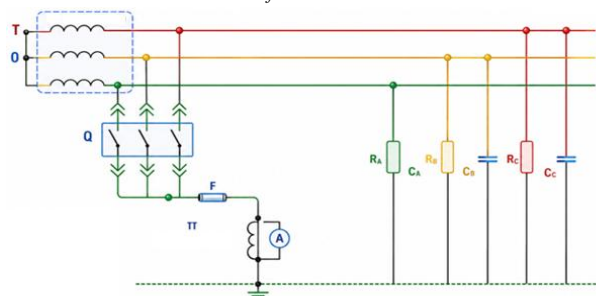
2. Materiallar va usullar (Methods and materials)

Yerga to'g'ridan-to'g'ri tutashuvga asoslangan usullar. Yerga to'g'ridan-to'g'ri tutashuv podstantsiya shinalariga ulangan avtomatik o'chirgichli zaxira elementi bilan jihozlangan podstansiya amalga oshiriladi. Bunda o'lchash asboblarning ulanish sxemasi 1-rasmda keltirilgan.

Sun'iy yerga tutashuv fazalardan birida avtomatik o'chirgichdan (Q) keyin hosil qilinadi. Avtomatik o'chirgichning yerga ulangan shinasi bilan yerga ulash o'tkazgichi orasiga tok transformatori (TT) ulanadi. Uning birlamchi toki kutilayotgan bir fazali yerga tutashuv tokidan 1,5–2 marta katta bo'lishi kerak [5-7].

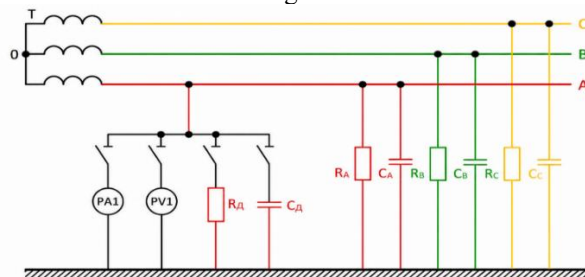
Bir fazali yerga tutashuv vaqtida ampermetr (A) aktiv tashkil etuvchi va yuqori garmonik toklarni ham o'z ichiga olgan to'liq tutashuv tokini ko'rsatadi. Tarmoq fazasi izolyatsiyasining yerga nisbatan umumiy o'tkazuvchanligi bir fazali yerga qisqa tutashuv vaqtida o'lchanadigan yerga tutashuv toki $I_{f.e}$ va tarmoq fazasi kuchlanishining yerga nisbatan qiymati $U_{f.e}$ asosida aniqlanadi.

$$y = \frac{I_{f.e}}{U_{f.e}} \quad (1)$$



1-rasm. Bevosita bir fazali yerga tutashuv usuli yordamida yerga tutashuv tokini o'lchash sxemasi
Fig.1. Scheme for measuring ground fault current using the direct single-phase ground fault method

Uzoq vaqt davomida 1000 V dan yuqori kuchlanishli elektr tarmoqlarining izolyatsiya parametrlarini tadqiq etishda qo'llanilgan asosiy usullardan biri L.V. Gladilin [6] tomonidan batafsil ishlab chiqilgan ampermetr–voltmetr usuli hisoblangan.



2-rasm. Ampermetr-voltmetr usulining prinsipial sxemasi
Fig.2. Principle diagram of the ammeter-voltmeter method



Ushbu usulda ikkita asosiy o'lash rejimi qo'llaniladi: salt ishlash rejimi va qisqa tutashuv rejimi. $U_{f.e}$ kuchlanishi hamda bir fazali yerga tutashuv toki $I_{f.e}$ ni o'lash orqali tarmoq izolyasiyasining qarshiligi aniqlanadi. Ushbu usulning prinsipial sxemasi 2-rasmda keltirilgan.

$$y_{iz} = \frac{I_{f.e.}}{U_{f.e.}} = \sqrt{g_{iz}^2 + b_{iz}^2} \quad (2)$$

bu yerda y_{iz} , g_{iz} , b_{iz} — mos ravishda izolyasiyaning umumiy, aktiv va reaktiv o'tkazuvchanliklari.

Umumiy izolyasiya o'tkazuvchanligini aktiv va reaktiv tashkil etuvchilarga ajratish uchun qo'shimcha aktiv yoki reaktiv o'tkazuvchanlik ulangan holda fazaning yerga nisbatan kuchlanishi qo'shimcha ravishda o'lchanadi. Bunda umumiy izolyasiya o'tkazuvchanligi quyidagicha aniqlanadi [1-4]:

a) qo'shimcha aktiv o'tkazuvchanlik ulanganda:

$$y_{\Sigma} = \frac{I_{f.e.}}{U_{f.e.}} = \sqrt{(g_{iz} + g_{qo'sh})^2 + b_{iz}^2} \quad (3)$$

b) qo'shimcha reaktiv o'tkazuvchanlik ulanganda:

$$y_{\Sigma} = \frac{I_{f.e.}}{U_{f.e.}} = \sqrt{(b_{iz} + b_{qo'sh})^2 + g_{iz}^2} \quad (4)$$

bu yerda y_{Σ} — izolyasiyaning umumiy o'tkazuvchanligi, $U_{f.e.}$ — qo'shimcha o'tkazuvchanlik ulanganda fazaning yerga nisbatan kuchlanishi, $g_{qo'sh}$ va $b_{qo'sh}$ — mos ravishda qo'shimcha aktiv va reaktiv o'tkazuvchanliklar.

Umumiy o'tkazuvchanlikning tashkil etuvchilari (3) va (4) ifodalar asosida aniqlanadi [2-12]:

a) qo'shimcha aktiv o'tkazuvchanlik ulanganda:

$$g_{iz} = \frac{y_{\Sigma}^2 - y_{iz}^2 - g_{qo'sh}^2}{2 \cdot g_{qo'sh}}, \quad b_{iz} = \sqrt{y_{\Sigma}^2 - g_{qo'sh}^2} \quad (5)$$

b) qo'shimcha reaktiv o'tkazuvchanlik ulanganda:

$$b_{iz} = \frac{y_{\Sigma}^2 - y_{iz}^2 - b_{qo'sh}^2}{2 \cdot b_{qo'sh}}, \quad g_{iz} = \sqrt{y_{\Sigma}^2 - b_{qo'sh}^2} \quad (6)$$

Usulning minimal xatoligi qiymatlari quyidagi shartni qanoatlantiruvchi qo'shimcha o'tkazuvchanliklarni ulash orqali ta'minlanadi [3-7]:

$$g_{qo'sh}(y_{oki} - g_{qo'sh}) \leq \left(\frac{1}{2} \div 2\right) \cdot y_{iz} \quad (7)$$

Usulning afzalliklari:

- izolyasiyaning yerga nisbatan umumiy qarshiligi hamda uning aktiv va reaktiv tashkil etuvchilarini aniqlash imkoniyati;
- konstruktiv jihatdan soddaligi;
- o'lash tezkorligi;
- hisoblash ifodalarining soddaligi;
- amaliy qo'llash uchun yetarli aniqlikka egaligi.

Usulning kamchiliklari:

- o'lash jarayonida bir fazali yerga tutashuv hosil qilinishi natijasida qolgan ikki fazada kuchlanish ortib, fazalararo va ko'p fazali qisqa tutashuvlar yuzaga kelishi mumkin;
- bir fazali yerga tutashuv tokini o'lash o'lchovlarni amalga oshiruvchi xodimlar hamda foydalanilayotgan uskunalar uchun xavf tug'diradi;
- alohida fazalarning izolyasiya parametrlarini aniqlash imkoniyati mavjud emas;
- qisqa tutashuv rejimidan foydalanish o'lash davrida iste'molchilarni tarmoqdan uzishni talab qiladi, bu esa maqsadga muvofiq emas;
- teginish va qadam kuchlanishlarining yuzaga kelishi mumkin;
- elektr qabul qilgichlar va o'lash asboblarning ishdan chiqishiga olib kelishi mumkin;
- bir qator tashkiliy va texnik chora-tadbirlarni amalga oshirishni talab qiladi.



3. Natijalar (Results)

Taqsimlovchi elektr tarmoqlarida izolyatsiya parametrlarini aniqlash uchun bevosita bir fazali yerga tutashuv va ampermetr–voltmetr usullarining diagnostik imkoniyatlari tahlil qilindi. Tahlil natijalari mazkur usullar tarmoq izolyatsiyasining umumiy holatini tavsiflovchi elektr parametrlarini aniqlash imkonini berishini ko'rsatdi.

Bevosita bir fazali yerga tutashuv usulida tarmoq izolyatsiyasining yerga nisbatan umumiy o'tkazuvchanligi yerga tutashuv toki $I_{f.e.}$ ning faza kuchlanishi $U_{f.e.}$ ga nisbatidan aniqlandi:

$$y_{iz} = \frac{I_{f.e.}}{U_{f.e.}} \quad (8)$$

Mazkur bog'lanish asosida tarmoq izolyatsiyasining umumiy impedansi $Z_{iz}=1/y_{iz}$ orqali baholanadi. Umumiy o'tkazuvchanlikning ortishi yoki izolyatsiya impedansining kamayishi izolyatsiyaning eskirishi, namlanishi, ifloslanishi, mexanik shikastlanishi yoxud faza–yer oralig'ida sizib o'tish toklarining ko'payganini bildiruvchi diagnostik belgi sifatida qabul qilinadi.

Ampermetr–voltmetr usulidan foydalanish izolyatsiyaning faqat umumiy o'tkazuvchanligini emas, balki uning aktiv g_{iz} va reaktiv b_{iz} tashkil etuvchilarini ham aniqlash imkonini berdi. Bunda:

- aktiv o'tkazuvchanlik izolyatsiyadagi dielektrik yo'qotishlar va sizib o'tish toklarini tavsiflaydi;
- reaktiv o'tkazuvchanlik tarmoqning yerga nisbatan sig'im xususiyatlarini ifodalaydi;
- umumiy o'tkazuvchanlik aktiv va reaktiv tashkil etuvchilarning geometrik yig'indisi orqali aniqlanadi.

Tarmoq fazasiga ma'lum qiymatdagi qo'shimcha aktiv yoki reaktiv o'tkazuvchanlik ulanishidan oldin va keyin faza–yer kuchlanishini o'lchash orqali g_{iz} va b_{iz} qiymatlarini alohida hisoblash imkoniyati yaratildi. Natijada izolyatsiya holatini baholashda faqat bitta umumlashtirilgan ko'rsatkichdan foydalanish o'rniga, izolyatsiyadagi aktiv yo'qotishlar va sig'im toklarining o'zgarishini alohida kuzatish imkoniyati ta'minlandi.

O'lchash xatoligini kamaytirish uchun qo'shimcha aktiv yoki reaktiv o'tkazuvchanlik qiymati tarmoq izolyatsiyasining dastlabki umumiy o'tkazuvchanligiga mutanosib ravishda tanlanishi lozimligi aniqlandi. Fayldagi shartga muvofiq, qo'shimcha o'tkazuvchanlikning qiymati taxminan $0,5y_{iz}$ dan $2y_{iz}$ gacha bo'lgan oraliqda tanlanganda o'lchash sezgirligi oshadi va hisoblash xatoligi kamayadi.

Olingan analitik natijalar asosida elektr xavfsizligiga ta'sir qiluvchi quyidagi diagnostik holatlar aniqlandi:

g_{iz} ning ortishi izolyatsiyada aktiv sizib o'tish toki va dielektrik yo'qotishlarning ko'payganini ko'rsatadi;

b_{iz} ning ortishi tarmoqning yerga nisbatan sig'im toki oshishiga hamda bir fazali yerga tutashuv toklarining kattalashishiga olib keladi;

y_{iz} ning ortishi va Z_{iz} ning kamayishi izolyatsiya holatining yomonlashganini bildiradi;

yerga tutashuv tokining ko'payishi teginish va qadam kuchlanishlari yuzaga kelish ehtimolini oshiradi;

o'lchash vaqtida sog'lom fazalardagi kuchlanishning ortishi fazalararo yoki ko'p fazali qisqa tutashuv xavfini kuchaytiradi.

Faza va yer orasiga qo'shimcha aktiv o'tkazuvchanlik ulangandan so'ng, chiziqli kuchlanish moduli U_1 , nol ketma-ketlik kuchlanishi U_0 hamda fazaning yerga nisbatan kuchlanishi $U_{f.e.}$ ning o'lchangan qiymatlari asosida izolyatsiya parametrlari quyidagi tenglamalar yordamida aniqlanadi [13]:

a) tarmoq izolyatsiyasining aktiv o'tkazuvchanligi:

$$g = \left(\frac{U_n}{\sqrt{3 \cdot U_{f.e.}^2 + U_e^2}} - 1 \right) \cdot g_e \quad (9)$$

b) tarmoq izolyatsiyasining sig'im o'tkazuvchanligi:

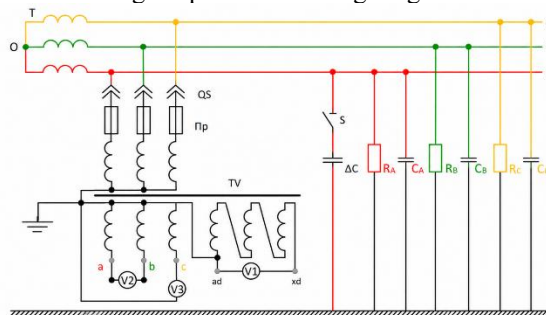
$$b = \frac{U_n \cdot U_{f.e.} \cdot g_0}{U_e \sqrt{3 \cdot U_{f.e.}^2 + U_e^2}} \quad (10)$$

v) tarmoq izolyatsiyasining umuiy o'tkazuvchanligi:

$$y = \sqrt{g^2 + b^2} \quad (11)$$

Aktiv o'tkazuvchanlikni ulashning afzalliklari:

- konstruktiv jihatdan soddaligi;
 - hisoblash ifodalarining soddaligi;
 - o'lchashlarning tezkorligi.
- Aktiv o'tkazuvchanlikni ulashning kamchiliklari:
- alohida fazalarning yerga nisbatan izolyasiya parametrlarini aniqlash imkoniyati mavjud emas;
 - 1000 V dan yuqori kuchlanishli qurilmalarda qo'llashga mos yuqori kuchlanishli aktiv o'tkazuvchanlikning sanoat namunalari mavjud emas;
 - qo'shimcha aktiv o'tkazuvchanlik sezilarli quvvatni (10 kVt va undan ortiq) tarqatish imkoniyatiga ega bo'lishi lozim. Bu esa uning parametrlarining harorat ta'sirida sezilarli o'zgarishiga va natijada o'lchash xatoligining ortishiga olib keladi.
- Yuqorida qayd etilgan kamchiliklarni faza va yer orasiga qo'shimcha sig'im ulashga asoslangan izolyasiya parametrlarini aniqlash usuli yordamida bartaraf etish mumkin (3-rasm).
- reaktiv quvvatni kompensatsiyalash va kuchlanishni rostlash uchun mo'ljallangan kondensator batareyalarida qo'llaniladigan quvvat kondensatorlaridan qo'shimcha sig'im sifatida foydalanish tavsiya etiladi;
 - o'lchash jarayonida qo'shimcha sig'im parametrlarining o'zgarishi minimal darajada bo'ladi.



3-rasm. Qo'shimcha sig'im yordamida izolyasiya parametrlarini aniqlash usuli
Fig.3. Method for determining insulation parameters using additional capacitance

Izolyasiya parametrlarini aniqlashning ushbu usuli asoslari [14- 15] manbalarda keltirilgan. Aktiv va reaktiv tashkil etuvchilarni aniqlash uchun hisoblash formulalari ishlab chiqilgan [8-10].

Shunday qilib, izolyatsiyaning umumiy, aktiv va reaktiv o'tkazuvchanliklarini kompleks baholash tarmoqdagi yashirin nuqsonlarni aniqlash, izolyatsiya holatining yomonlashish tendensiyasini kuzatish hamda elektr xavfsizligi xavflarini oldindan baholash uchun axborot asosini yaratadi.

4. Munozara (Discussion)

Tahlil qilingan usullarning asosiy afzalligi ularning konstruktiv soddaligi, o'lchash natijalarini tezkor olish imkoniyati va hisoblash ifodalarining nisbatan murakkab emasligidir. Bevosita bir fazali yerga tutashuv usuli yerga tutashuv tokining to'liq qiymatini, jumladan, uning aktiv va yuqori garmonik tashkil etuvchilarini hisobga olish imkonini beradi. Shu jihatdan usul tarmoqning umumiy izolyatsiya holatini tezkor baholashda yetarli darajada axborot beradi.

Biroq bevosita yerga tutashuv hosil qilishga asoslangan diagnostika jarayonining o'zi qo'shimcha elektr xavfini yuzaga keltiradi. O'lchash vaqtida shikastlanmagan fazalarning yerga nisbatan kuchlanishi ortadi. Bu esa izolyatsiyasi zaiflashgan boshqa fazalarda teshilish, fazalararo qisqa tutashuv yoki ko'p fazali avariya rivojlanishiga sabab bo'lishi mumkin. Bundan tashqari, yerga tutashuv toki o'lchov ishlarini bajarayotgan xodimlarga, tok transformatoriga, kommutatsiya apparatlariga va elektr qabul qilgichlarga xavf tug'diradi.

Ampermetr-voltmetr usuli umumiy o'tkazuvchanlikni aktiv va reaktiv tashkil etuvchilarga ajratishi bilan bevosita o'lchash usuliga nisbatan axborot jihatidan ustun hisoblanadi. Aktiv o'tkazuvchanlikning o'zgarishi izolyatsiya materialining holati bilan ko'proq bog'liq bo'lsa, reaktiv o'tkazuvchanlik tarmoq uzunligi, kabel va havo liniyalari ulushi hamda faza-yer sig'imlariga bog'liq. Shu sababli izolyatsiya holati faqat umumiy o'tkazuvchanlik bo'yicha emas, balki g_{iz} va b_{iz} qiymatlarining vaqt davomida o'zgarish tendensiyasi asosida baholanishi maqsadga muvofiq.

Shu bilan birga, tahlil qilingan usullar alohida fazalarning izolyatsiya parametrlarini mustaqil aniqlash imkonini bermaydi. Natijada izolyatsiya nuqsonining qaysi fazada yoki tarmoqning qaysi qismida joylashganini bevosita aniqlash qiyinlashadi. Qisqa tutashuv rejimidan foydalanish ayrim holatlarda iste'molchilarni elektr ta'minotidan vaqtincha uzishni, maxsus yerga ulash qurilmalaridan foydalanishni hamda qo'shimcha tashkiliy va texnik xavfsizlik choralarini amalga oshirishni talab qiladi.

O'lchash natijalarining ishonchililigiga tarmoq kuchlanishining tebranishi, yuqori garmonikalar, fazalar sig'imining nosimmetriyasi, kommutatsiya jarayonlari, o'lchash asboblarning aniqlik sinfi va



yerga ulash qurilmasining qarshiligi ta'sir ko'rsatishi mumkin. Shu sababli diagnostik xulosa bir martalik o'lchash asosida emas, balki bir xil sharoitlarda bajarilgan takroriy o'lchashlar va parametrlarning vaqt bo'yicha o'zgarishini tahlil qilish asosida chiqarilishi lozim.

O'tkazilgan tahlil taqsimlovchi elektr tarmoqlarida izolyatsiya diagnostikasini yanada rivojlantirish zarurligini ko'rsatadi. Istiqboldagi o'lchash tizimi sun'iy qisqa tutashuv hosil qilmasdan, tarmoqning ish rejimini buzmasdan, alohida fazalar parametrlarini aniqlashi va xavfli o'zgarishlar haqida tezkor ogohlantirish berishi kerak.

5. Xulosa (Conclusion)

izolyatsiyaning umumiy o'tkazuvchanligini yerga tutashuv toki va faza–yer kuchlanishi orqali aniqlash haqidagi xulosa maqolada keltirilgan $y_{iz}=I_{f.c}/U_{f.c}$ bog'lanishiga, impedansni baholash esa $Z_{iz}=1/y_{iz}$ ifodasiga asoslanadi. Qo'shimcha aktiv yoki reaktiv o'tkazuvchanlikni ulash orqali izolyatsiya o'tkazuvchanligining tashkil etuvchilarini alohida baholash imkoniyati ham usullar va natijalar qismlarida yoritilgan. Biroq umumiy o'tkazuvchanlikning ortishi va impedansning kamayishini izolyatsiya holatining yomonlashuvi bilan bog'lashda tarmoq konfiguratsiyasi hamda ish rejimidagi o'zgarishlar hisobga olinishi lozim. Maqolaning munozara qismida reaktiv o'tkazuvchanlikning tarmoq uzunligi, kabel va havo liniyalari ulushi hamda faza–yer sig'implariga bog'liqligi qayd etilganligi sababli mazkur diagnostik belgilarni talqin qilish shartlari xulosada ham aniq ifodalanishi zarur.

Maqolada qo'shimcha o'tkazuvchanlikni dastlabki umumiy o'tkazuvchanlikning 0,5–2,0 baravari, ya'ni 50–200 foizi oralig'ida tanlash o'lchash sezgirliigi va hisoblash xatoligiga ta'sir etuvchi shart sifatida keltirilgan. Ushbu qiymatlar xatolikning kamayish foizini emas, qo'shimcha o'tkazuvchanlikni tanlash diapazonini ifodalaydi. Biroq mazkur oraliq uchun xatolikning boshlang'ich va yakuniy qiymatlari, sezgirlikning o'zgarishi hamda taqqoslama hisoblash natijalari taqdim etilmagan. Shuning uchun bu shartning keltirilishi usulning aniqligi oshganligini miqdoriy jihatdan tasdiqlash uchun yetarli emas.

Mavjud usullarning amaliy cheklovlariga oid xulosalar asosiy matndagi texnik ma'lumotlar bilan bog'langan. Xususan, qo'shimcha aktiv o'tkazuvchanlik elementining 10 kVt va undan ortiq quvvatni tarqatish imkoniyatiga ega bo'lishi zarurati va harorat ta'sirida parametrlarining o'zgarishi o'lchash aniqligini ta'minlashni murakkablashtiruvchi omillar sifatida ko'rsatilgan. Bevosita yerga tutashuv usulida tok transformatorining birlamchi nominal tokini kutilayotgan yerga tutashuv tokidan 1,5–2 baravar katta tanlash talabi ham bayon etilgan. Ushbu ma'lumotlar o'lchash vositalarini tanlashda texnik imkoniyatlar va xavfsizlik shartlarini hisobga olish zarurligini asoslaydi. Shu bilan birga, ular haroratning o'lchash xatoligiga ta'sirini yoki usullarning umumiy samaradorligini miqdoriy baholash o'rnini bosa olmaydi.

Izolyatsiya parametrlari asosida teginish va qadam kuchlanishlari hamda ko'p fazali avariylar xavfini oldindan baholash haqidagi fikrlar istiqbolli diagnostik yo'nalish sifatida maqola mazmunidan kelib chiqadi. Biroq bunday baholashning chegaraviy mezonlari, hisoblash algoritmi va tekshirish natijalari keltirilmaganligi sababli ushbu imkoniyatlarni amaliy jihatdan tasdiqlangan natija sifatida talqin qilish yetarlicha asosli emas. Tarmoq ish rejimini buzmaydigan, fazalar bo'yicha selektiv diagnostikani amalga oshiradigan va xavfli o'zgarishlarni avtomatik baholaydigan monitoring tizimini ishlab chiqish haqidagi fikr esa aniqlangan cheklovlardan kelib chiqadigan ilmiy-amaliy tavsiya sifatida o'rinalidir.

ADABIYOTLAR

1. Л.В. Гладилин, В.И. Щуцкий, Ю.Г. Бацеев и Н.И. Чеботаев, “Электробезопасность в горнодобывающей промышленности” // М.: Недра, 1977. 327 с.
2. P. Olszowiec, “Измерение и контроль изоляции в действующих сетях переменного и постоянного тока с изолированной нейтралью”, // Lecture Notes in Electrical Engineering 167, Springer, Berlin–Heidelberg (2013). <https://doi.org/10.1007/978-3-642-29755-7>
3. B. Utegulov, “Особые вопросы обеспечения электробезопасности в сетях с изолированной нейтралью напряжением до 1000 В на горных предприятиях”, // Industrial Engineering, IntechOpen (2018). <https://doi.org/10.5772/intechopen.81384>
4. B.B. Utegulov, A.B. Utegulov и A.B. Uakhitova, “Моделирование измерения полной проводимости изоляции в шахтной сети с изолированной нейтралью напряжением до 1000 В с использованием MATLAB/Simulink”, // J. Min. Sci. 53, 282–290 (2017). <https://doi.org/10.1134/S1062739117022128>
5. А.И. Сидоров и Х.Д. Бобоев, “Исследование погрешностей косвенного метода измерения параметров изоляции фаз сети относительно земли на имитационной модели”, // Безопасность труда в промышленности, № 9, с. 24–29 (2020). <https://doi.org/10.24000/0409-2961-2020-9-24-29>
6. А.И. Сидоров, Х.Д. Бобоев, Ю.В. Медведева и Ш.С. Саъдуллозода, “Исследование кос-

венных методов определения параметров изоляции на компьютерной модели” // Вестник Научного центра ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности, № 1, с. 47–54 (2021). <https://doi.org/10.25558/VOSTNII.2021.32.20.005>

7. Х.Д. Бобоев, Ю.И. Аверьянов, А.В. Богданов и И.Л. Кравчук, “Анализ погрешностей косвенного метода контроля параметров изоляции сети относительно земли в программной среде MATLAB/Simulink”, // Вестник ЮУрГУ. Серия “Энергетика” 22(1), 106–116 (2022). <https://doi.org/10.14529/power220112>

8. Х.Д. Бобоев, Ю.И. Аверьянов, А.В. Богданов и И.Л. Кравчук, “Организация контроля изоляции в распределительной сети карьера „Тарпор”, // Вестник ЮУрГУ. Серия “Энергетика” 21(4), 57–65 (2021). <https://doi.org/10.14529/power210407>

9. Х.Д. Бобоев и А.В. Богданов, “Параметры изоляции относительно земли в карьерных распределительных сетях горнодобывающих предприятий Республики Таджикистан”, // Вестник ЮУрГУ. Серия “Энергетика” 21(1), 29–37 (2021). <https://doi.org/10.14529/power210103>

10. Q. Zhang и H. Tang, “Диагностика неоднородного ухудшения изоляции электрических кабелей посредством оценки распределённой шунтирующей проводимости”, // Control Eng. Pract. 21(9), 1195–1203 (2013). <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2013.04.006>

11. X. Zeng, K.K. Li, W.L. Chan и X. Yin, “Эксплуатационная оценка безопасности при замыканиях на землю в системах электроснабжения горных предприятий” // IEEE Trans. Ind. Appl. 39(6), 1563–1569 (2003). <https://doi.org/10.1109/TIA.2003.818994>

12. V. Kachesov, A. Lebedev и E.T. Kitova, “Мониторинг в электрических сетях 6–35 кВ, определение места однофазного замыкания на землю и выявление повреждённого присоединения” // Int. J. Electr. Power Energy Syst. 152, 109271 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2023.109271>

13. A.A. Achitaev, K.V. Suslov, I.O. Volkova, V.E. Kozhemyakin и Y.V. Dvoryansky, “Разработка алгоритма идентификации режимов однофазного замыкания на землю в кабельных и воздушных линиях сетей с изолированной нейтралью” // Energy Rep. 9, 1079–1086 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.01.046>

14. X. Lin, J. Sun, I. Kursan, F. Zhao, Z. Li, X. Li и D. Yang, “Алгоритм выбора повреждённого присоединения на основе компенсированной проводимости нулевой последовательности в распределительной сети с заземлением нейтрали через катушку Петерсена” // Int. J. Electr. Power Energy Syst. 63, 747–752 (2014). <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2014.06.029>

15. A. Farughian, L. Kumpulainen и K. Kauhaniemi, “Обзор методов индикации и определения места замыкания на землю в компенсированных распределительных сетях среднего напряжения и сетях с изолированной нейтралью” // Electr. Power Syst. Res. 154, 373–380 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2017.09.006>

REFERENCES

1. L.V. Gladilin, V.I. Shchutsky, Yu.G. Batsezhev, and N.I. Chebotaev, “Electrical Safety in the Mining Industry,” // Moscow: Nedra, 327 p. (1977). (In Russian).

2. P. Olszowiec, “Insulation Measurement and Supervision in Live AC and DC Unearthed Systems,” // Lecture Notes in Electrical Engineering 167, Springer, Berlin–Heidelberg (2013). <https://doi.org/10.1007/978-3-642-29755-7>

9. B. Utegulov, “Special Issues of Ensuring Electrical Safety in Networks with Isolated Neutral Voltage up to 1000 V at Mining Enterprises,” // Industrial Engineering, IntechOpen (2018). <https://doi.org/10.5772/intechopen.81384>

4. B.B. Utegulov, A.B. Utegulov, and A.B. Uakhitova, “Modeling Method for Measuring the Admittance of Insulation in a Network with an Isolated Neutral Voltage up to 1000 V in Mines Using MATLAB/Simulink,” // J. Min. Sci. 53, 282–290 (2017). <https://doi.org/10.1134/S1062739117022128>

5. A.I. Sidorov and Kh.D. Boboev, “Investigation of Errors in an Indirect Method for Measuring Phase-to-Ground Insulation Parameters Using a Simulation Model,” // Occupational Safety in Industry, no. 9, pp. 24–29 (2020). <https://doi.org/10.24000/0409-2961-2020-9-24-29> (In Russian).

6. A.I. Sidorov, Kh.D. Boboev, Yu.V. Medvedeva, and Sh.S. Sadullozoda, “Investigation of Indirect Methods for Determining Insulation Parameters Using a Computer Model,” // Bulletin of the VostNII Scientific Center for Industrial and Environmental Safety, no. 1, pp. 47–54 (2021). <https://doi.org/10.25558/VOSTNII.2021.32.20.005> (In Russian).

7. Kh.D. Boboev, Yu.I. Averyanov, A.V. Bogdanov, and I.L. Kravchuk, “Error Analysis of the Indirect Method for Monitoring Network Insulation Parameters Relative to Ground in MATLAB/Simulink,” // Bulletin of the South Ural State University. Series: Power Engineering 22(1), 106–116 (2022). <https://doi.org/10.14529/power220112> (In Russian).

8. Kh.D. Boboev, Yu.I. Averyanov, A.V. Bogdanov, and I.L. Kravchuk, “Insulation Monitoring in the Distribution Network of the Tarror Open-Pit Mine,” // Bulletin of the South Ural State University.

Series: Power Engineering 21(4), 57–65 (2021). <https://doi.org/10.14529/power210407> (In Russian).

9. Kh.D. Boboev and A.V. Bogdanov, “Phase-to-Ground Insulation Parameters in Open-Pit Distribution Networks of Mining Enterprises in the Republic of Tajikistan,” // Bulletin of the South Ural State University. Series: Power Engineering 21(1), 29–37 (2021). <https://doi.org/10.14529/power210103> (In Russian).

10. Q. Zhang and H. Tang, “Diagnosis of Inhomogeneous Insulation Degradation in Electric Cables by Distributed Shunt Conductance Estimation,” // Control Eng. Pract. 21(9), 1195–1203 (2013). <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2013.04.006>

11. X. Zeng, K.K. Li, W.L. Chan, and X. Yin, “On-Site Safety Evaluation for Earth Fault in Mining Power Systems,” // IEEE Trans. Ind. Appl. 39(6), 1563–1569 (2003). <https://doi.org/10.1109/TIA.2003.818994>

12. V. Kachesov, A. Lebedev, and E.T. Kitova, “Monitoring in 6–35 kV Power Networks, Location of Single-Phase Ground Fault and Detection of Fault Feeder,” // Int. J. Electr. Power Energy Syst. 152, 109271 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2023.109271>

13. A.A. Achitaev, K.V. Suslov, I.O. Volkova, V.E. Kozhemyakin, and Y.V. Dvoryansky, “Development of an Algorithm for Identifying Single-Phase Ground Fault Conditions in Cable and Overhead Lines in Networks with Isolated Neutral,” // Energy Rep. 9, 1079–1086 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.01.046>

14. X. Lin, J. Sun, I. Kursan, F. Zhao, Z. Li, X. Li, and D. Yang, “Zero-Sequence Compensated Admittance-Based Faulty Feeder Selection Algorithm Used for a Distribution Network with Neutral Grounding through a Petersen Coil,” // Int. J. Electr. Power Energy Syst. 63, 747–752 (2014). <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2014.06.029>

15. A. Farughian, L. Kumpulainen, and K. Kauhaniemi, “Review of Methodologies for Earth-Fault Indication and Location in Compensated and Unearthed Medium-Voltage Distribution Networks,” // Electr. Power Syst. Res. 154, 373–380 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2017.09.006>